

XVI ERIAC
DECIMOSEXTO ENCUENTRO
REGIONAL IBEROAMERICANO DE CIGRÉ

17 al 21 de mayo de 2015



A1-01

Comité de Estudio A1 - Máquinas Eléctricas Rotativas

GENERACIÓN DISTRIBUIDA: LOS NUEVOS CONCEPTOS DE EXCITACIÓN Y DE TOMA DE CARGA ACTIVA Y REACTIVA

J.C. GOMEZ*
IPSEP-UNRC
Argentina

E.F. FLORENA
IPSEP-UNRC
Argentina

S.M. NESCI
IPSEP-UNRC
Argentina

D.H. TOURN
IPSEP-UNRC
Argentina

***Resumen** – Los conceptos tradicionales de excitación y toma de cargas activas y reactivas, bien conocidos y aplicados desde hace mucho tiempo a generadores sincrónicos, deben analizarse desde nuevos puntos de vista al aplicarse a generación distribuida. Para este análisis se recurre a la aplicación del concepto que señala que para el desarrollo de cupla (potencia) en forma continua se requiere de la presencia del flujo estatórico, del rotórico y que entre ellos exista un ángulo constante distinto de cero. La incorporación de la electrónica de potencia flexibiliza los criterios empleados hasta ahora. Se presentan en detalle los principios de excitación y toma de carga a la máquina sincrónica, extendiendo su aplicación a máquina de inducción y a fuentes con convertidores, considerando la variabilidad de magnitudes que tradicionalmente se toman como constantes. Se justifican en base a este simple principio las acciones que se llevan a cabo para la regulación de tensión y toma de carga. Se analiza el efecto magnetizante que se produce tanto para corrientes retrasadas (bajo factor de potencia) como desbalanceadas. Se muestran resultados experimentales y de modelado que afirman estos conceptos. Se concluye con que el mismo principio de excitación es aplicable tanto a las máquinas sincrónicas, de inducción como así también a las fuentes que emplean convertidores.*

***Palabras clave:** Generación distribuida, excitación, toma de carga, factor de potencia y desbalance.*

1 INTRODUCCIÓN

Los conceptos tradicionales de excitación y toma de cargas activas y reactivas, bien conocidos y aplicados desde hace mucho tiempo a generadores sincrónicos, deben analizarse desde nuevos puntos de vista al aplicarse a generación distribuida, empleando tanto máquinas sincrónicas como también asincrónicas. La denominación “generación distribuida” incluye a la generación de energía eléctrica de baja potencia (normalmente menor a 10 MVA), a partir de fuentes de energía cercana al consumo, generalmente no-despachables, trifásicas o monofásicas y usualmente fuera del control de la empresa distribuidora [1]. Las condiciones de trabajo de estas fuentes y su conexión a la red de distribución, generan la necesidad de su estudio bajo condiciones muy distintas a las de los generadores convencionales de gran potencia y usualmente alejados del consumo. Entre las características especiales de su operación deben considerarse factores tales como presencia de desbalance, existencia de armónicas, debilidad del sistema eléctrico, factor de potencia bajo, etc.

* Ruta 36 Km601, Río Cuarto, Córdoba, Argentina – e-mail: *jcgomez@ing.unrc.edu.ar*

2 COMPORTAMIENTO EN RÉGIMEN PERMANENTE

2.1 Máquina Sincrónica

Hasta hace unos pocos años, la gran mayoría de los generadores eran del tipo sincrónico, para los cuales la excitación se consideraba tradicionalmente como que era simplemente suministrada y regulada por medio de una fuente de corriente continua conectada a su circuito rotórico.

Si el generador opera en forma aislada (funcionamiento en isla), el incremento o decremento de la mencionada excitación de corriente continua, produce un aumento o disminución de la tensión generada por la máquina sincrónica. Funcionando a tensión nominal, la magnitud y el factor de potencia de la corriente de carga están exclusivamente determinados por las características (impedancia) de la carga. La característica inductiva o capacitiva de la carga conectada en la isla indica respectivamente el valor desmagnetizante o magnetizante de esta corriente.

La Fig. 1 muestra la posición espacial de las ondas de fuerza magnetomotriz principal o de campo (creada por la corriente continua circulando por el arrollamiento rotórico), la de reacción de armadura (generada por la corriente de carga que atraviesa el circuito estatórico con su correspondiente ángulo de retraso) y la resultante (composición de las dos anteriores). En este caso se pone de manifiesto que el carácter inductivo de la corriente de carga da por resultado un efecto desmagnetizante, con una componente en dirección opuesta a la fmm principal de campo.

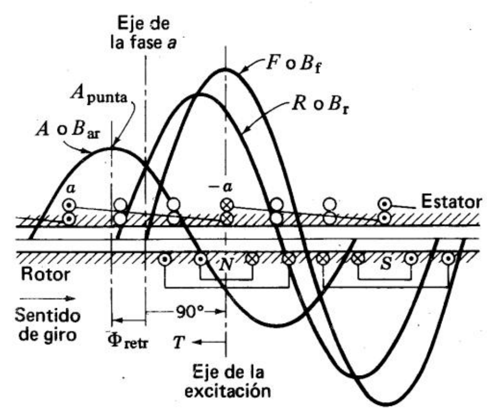


Fig. 1, Efecto desmagnetizante de la onda de reacción de armadura [2].

La Fig. 2 indica lo ya mencionado en la Fig. 1, pero ahora en forma vectorial, donde puede verse que al descomponer la reacción de armadura A, aparecería un vector opuesto al correspondiente al campo principal F, o sea desmagnetizante.

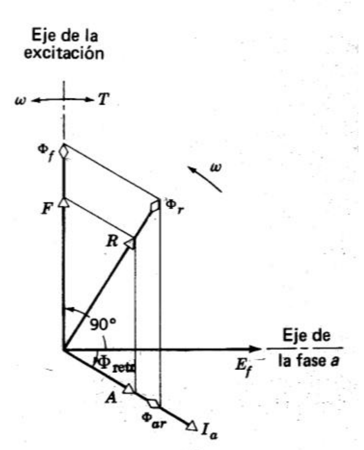


Figura 2, Efecto de la reacción de armadura, expresado en forma vectorial [2].

En caso de que la corriente de carga tuviera carácter capacitivo, corriente adelantada, puede inferirse fácilmente de las dos figuras anteriores, que su efecto sería magnetizante o sea reforzaría al campo principal.

Si la máquina está conectada a un sistema eléctrico de alta potencia en relación a la potencia nominal de la misma, la modificación de la corriente de excitación sin alterar la potencia mecánica o la potencia activa, cambia respectivamente el factor de potencia de la corriente entregada o absorbida de la red, durante la operación como generador o motor. Este comportamiento se justifica con el análisis que se efectúa a continuación.
La Fig. 3 representa el diagrama vectorial de las tensiones (fuerza electromotriz Ef y tensión en terminales Vt), mostrando también la corriente de carga Ia y la caída en la reactancia sincrónica (IaXs), habiendo despreciado la caída en la resistencia de dispersión para este tipo de máquina, donde puede verse la operación como generador ya que Ef adelanta respecto a Vt.

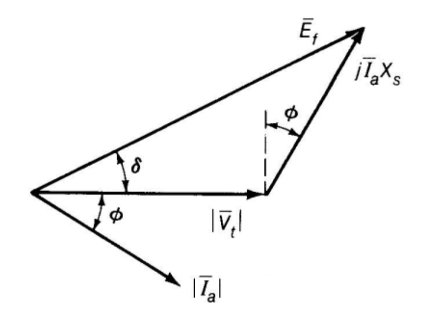


Fig. 3 Diagrama vectorial del generador sincrónico con carga algo inductiva [2].

La potencia o cupla desarrollada por la máquina sincrónica está dada por la expresión (1).

$$P = 1/Xs\ Ef\ \ Vt\ \ sen\ \delta \quad (1)$$

Si como se dijo, la máquina no modifica su potencia activa, significa que P es constante. Además por estar conectada a un sistema de gran potencia, la tensión del mismo es invariable por lo tanto Vt es también constante. El resultado es que el producto Ef sen δ deberá mantenerse invariable, significando que la componente vertical de Ef es constante.
La Fig. 4 pone de manifiesto este comportamiento, donde se ve que al incrementar o reducir la corriente de excitación del rotor, Ef respectivamente se transforma en E´f1 o en E´f2 , máquina sobre-excitada o sub-excitada, sin cambiar la potencia activa, que es también expresada por la ecuación (2).

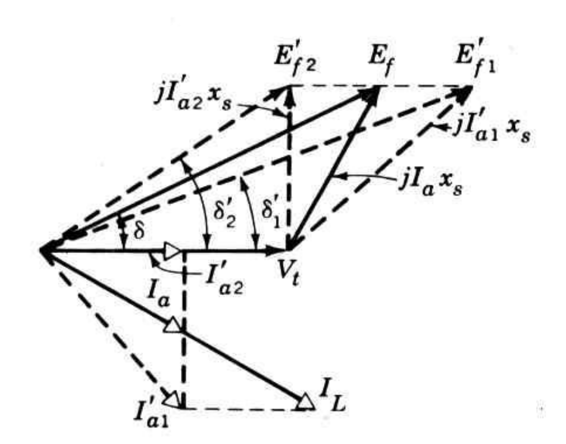


Fig. 4, Cambios sobre la fem Ef y la corriente de carga Ia causados por la variación de la corriente de excitación en el rotor [2].

$$P = \sqrt{3}\ Vt\ Ia \cos\varphi \qquad (2)$$

Sin embargo, la corriente de carga Ia modifica su magnitud y posición angular, pasando respectivamente a $Iá_1$ y $Iá_2$, manteniendo invariable su componente activa (a fin de cumplir con la ecuación (2)). Esta modificación de magnitud y fase de la corriente cambia su aporte al efecto magnetizante o desmagnetizante.

En otras palabras, en caso de que la máquina se encuentre conectada a un sistema eléctrico importante, según el factor de potencia de la corriente de carga, el campo de reacción de armadura generado por esta corriente, similarmente a lo ya explicado para la operación en isla, posee efecto magnetizante o desmagnetizante respecto al efecto de la corriente de excitación suministrada al arrollamiento rotórico.
Por lo tanto, puede afirmarse que la máquina sincrónica es una máquina de doble excitación, ya que la excitación necesaria para la operación estable puede ser suministrada al arrollamiento rotórico, al estatórico o a ambos simultáneamente.
Al estar la máquina sincrónica conectada a un sistema eléctrico de gran potencia (relativa respecto a la suya) puede regularse el factor de potencia de la corriente suministrada, o sea que genera corrientes inductivas o capacitivas. El ajuste de la corriente continua que circula por el arrollamiento de excitación permite pasar de suministrar corriente reactiva inductiva a reactiva capacitiva y viceversa. En otras palabras, la falta o exceso de efecto magnetizante desde el rotor, es compensado por un efecto opuesto (si hay un faltante refuerza la magnetización y si hay un exceso el efecto es atenuarlo como desmagnetizante) de la componente reactiva de la corriente de carga que circula por el arrollamiento estatórico (Ia). Por ello, el cambio en la corriente de excitación rotórica, modifica la distribución de las cargas reactivas entre las máquinas sincrónicas conectadas a un sistema de alta potencia.
Si se piensa que el generador sincrónico deja de ser una máquina de cientos de MVA, sino de unos pocos kVA y que su punto de conexión se localiza en el sistema de distribución, la premisa de tensión de red invariable pierde firmeza, por lo que debe analizarse el efecto de su variabilidad. El descenso de la tensión de red sin modificación en la excitación del generador, es equivalente a un incremento relativo de la excitación, por lo tanto pasa a suministrar corriente adelantada y caso contrario a la inversa, atrasada.
En resumen, la excitación requerida por la máquina sincrónica para operar bajo condiciones dadas de tensión, frecuencia y carga, se suministra vía el rotor o el estator, siendo esta participación de excitación determinada por la magnitud de la tensión de excitación de corriente continua aplicada al arrollamiento rotórico.

2.2 Máquina Asincrónica

La máquina asincrónica más tradicional, es el motor de inducción con rotor de jaula de ardilla, que al no tener tal circuito contacto alguno con el exterior, no recibe excitación externa alguna vía el rotor. Por ello, la excitación necesaria para la operación de la máquina asíncrona debe ser suministrada vía el arrollamiento estatórico, conjuntamente con la potencia (eléctrica) activa que es luego convertida en potencia mecánica disponible en el eje de la máquina operando como motor. La corriente y el flujo rotóricos son generados por inducción desde el estator, de ahí su nombre de máquina de inducción. La corriente magnetizante absorbida por el estator representa un monto importante de la corriente de carga, que en vacío alcanza al 30 % de la de plena carga de la máquina.
La Fig. 5 muestra las ondas de flujo rotórico y resultante para el caso en que pueda despreciarse el desfasaje causado por la reactancia del rotor (muy baja frecuencia rotórica).

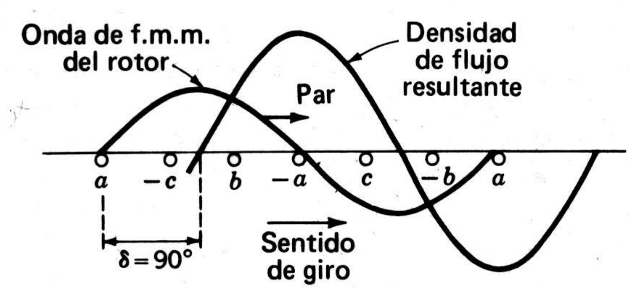


Fig. 5, Ondas de fmm y flujo de la máquina de inducción (reactancia rotórica despreciable) [2].

En caso de que la máquina con rotor de jaula opere como generador, se le debe inyectar potencia mecánica por el eje rotórico y extraer potencia eléctrica por el arrollamiento estatórico. La excitación requerida para su operación normal, debe suministrase al arrollamiento estatórico ya sea a partir de la red eléctrica (generada por alguna máquina sincrónica) o por medio de la instalación de capacitores de potencia adecuada, en paralelo [3].

El motor de inducción con rotor bobinado, posee una serie de características especiales que justifican su mayor costo, particularmente para sobrellevar arranques rigurosos. La máquina asincrónica con rotor bobinado operando como generador (generador de inducción), que puede además recibir excitación por un arrollamiento trifásico localizado en el rotor, se denomina generador doblemente alimentado. Este es el principio de operación de la mayoría de los generadores eólicos actuales [1, 3].
La excitación requerida por este tipo de generador, para las condiciones de tensión, frecuencia y carga, puede ser suministrada tanto al rotor como al estator, similarmente a lo explicado para la máquina sincrónica, siendo en este caso su participación determinada por la magnitud y frecuencia de la excitación de corriente alterna que se suministra al rotor de la máquina.

3 DESARROLLO DE CUPLA

La máquina sincrónica, como todas las máquinas eléctricas, desarrolla cupla en forma continua, debido a la existencia de dos flujos de magnitud constante, formando entre ellos un ángulo fijo y distinto de cero [2]. Uno de los flujos, el rotórico se encuentra localizado sobre el rotor (determinado por la corriente de excitación y por la posición del correspondiente bobinado), por lo que se desarrollará cupla, sí y solo sí el rotor gira precisamente a la velocidad sincrónica, que es la velocidad a la que gira el flujo estatórico (tres arrollamientos a 120º en el espacio, recorridos por tres corrientes a 120º en el tiempo generan un flujo giratorio) [1, 2]. Este flujo estatórico gira respecto al estator a una velocidad fijada por la frecuencia y el número de polos. En conclusión este tipo de máquina requiere girar a velocidad sincrónica para su operación continua en régimen estable.
Similarmente, para la máquina asincrónica o de inducción, se deben cumplir condiciones análogas en lo que se refiere a las magnitudes y posiciones relativas de los flujos involucrados. En caso de disponer de rotor bobinado, posee tres arrollamientos a 120º en el espacio, por lo que es posible generar un flujo rotatorio respecto al rotor, alimentando estos arrollamientos con corriente alterna trifásica (a 120º en el tiempo) de frecuencia apropiada.
Esta frecuencia debe tener el valor adecuado para que la velocidad del rotor más la del flujo rotórico respecto al rotor, iguale a la frecuencia estatórica a fin de obtener ángulo constante entre los flujos estatórico y retórico [2]. Este es el principio de operación del generador de inducción doblemente alimentado (Double Fed Induction Generator, DFIG) [3]. Entonces, es posible reunir las condiciones para el desarrollo continuo de cupla para velocidades de giro distintas a la velocidad sincrónica, por lo que este tipo de máquina es especialmente apropiada para explotar energías provenientes de fuentes de velocidad variable, siempre y cuando se pueda ir variando la frecuencia inyectada al rotor en respuesta a los cambios de velocidad del mismo [1].
La electrónica de potencia hoy disponible, flexibiliza los criterios hasta ahora rígidamente aplicados, permitiendo inyectar al rotor prácticamente en forma instantánea la magnitud, ángulo y frecuencia de excitación requerida. Esta versatilidad en la excitación habilita mediante el cambio en magnitud, el control de potencia reactiva y a través del control del ángulo (por variación instantánea de la frecuencia) lograr el ajuste de potencia activa [4, 5].
En lugar de regular la operación del generador sincrónico o asincrónico, con la premisa de mantener la frecuencia igual a la de la red, se está usando cada vez más la metodología denominada “full-converter”, en la cual se genera a la frecuencia de óptimo aprovechamiento del recurso energético y se convierte posteriormente a la frecuencia de red, inyectándose al sistema eléctrico con la magnitud, ángulo y frecuencia adecuadas. Se está difundiendo cada día más la generación distribuida empleando máquina sincrónica con excitación fija y no controlable, lograda mediante el empleo de imanes permanentes.
En estos casos, el 100 % de la potencia es convertida mediante electrónica de potencia, compensando el incremento de pérdidas en la electrónica con la posibilidad de aprovechar energías disponibles dentro de un amplio rango de velocidades.
El estudio analítico para la regulación de potencia en esta situación, se hace empleando el concepto de “tensión generada” y “tensión del sistema”, como se muestra en la Fig. 6, la que es análoga a la previamente mostrada Fig. 3, reemplazando Ef por Vg y Vt por Vs (Ia por I e φ por θ), y en las ecuaciones (3) y (4).

$$P = (1/X)\ Vg\ Vs\ \mathrm{sen}\,\delta \qquad (3)$$

$$Q = Vs^2/X\ [1- (Vg/Vs)\cos\delta] \qquad (4)$$

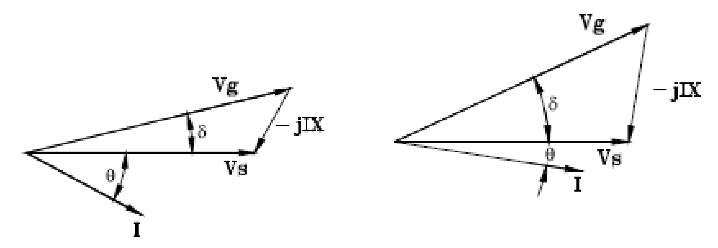


Fig. 6, Diagramas vectoriales del control de un inversor.

Como ambos tipos de máquina, sincrónica y asincrónica, cumplen con el mismo principio de operación, la distribución de potencia activa y reactiva, como también la reacción frente a una súbita variación de carga (caso extremo de cortocircuito en terminales) sigue reglas similares [4, 5, 6]. En otras palabras, la distribución de potencia reactiva se basa en la corriente de excitación, la distribución de potencia activa se basa en el valor de cupla aplicada al eje. El fenómeno de cortocircuito puede explicarse por medio del uso del principio del flujo concatenado constante [2].

4 COMPORTAMIENTO EN RÉGIMEN TRANSITORIO:

El estudio del régimen transitorio puede llevarse a cabo tanto para la máquina sincrónica como asincrónica, en base al concepto del "flujo concatenado constante", teorema que establece que cualquier cambio en el valor del flujo concatenado, genera corrientes que se oponen o reaccionan al cambio, circulando por todos los caminos posibles de la máquina" [2]. Como no existe una fuente externa para mantener estas corrientes circulando, las mismas decaerán con el tiempo, siguiendo la constante de tiempo de cada circuito involucrado. Este principio se aplica usualmente a la máquina sincrónica, no obstante las simulaciones y ensayos experimentales mostrados aquí, indican que es también aplicable a la máquina asincrónica [6]. La teoría es aplicable solo durante los primeros instantes de la perturbación, ya que se considera que la velocidad de giro se mantiene constante.
Por ejemplo, en caso de una brusca variación de la tensión de la red, si es un descenso puede ser interpretado como un incremento brusco de la fuerza electromotriz de la máquina. Esta sobre-excitación produce un retraso en la fase de la corriente suministrada por la red. En caso de un incremento súbito de tensión, el resultado será un adelanto de fase de la corriente. Si se presenta un cambio de velocidad, aparece un notable efecto en la corriente del circuito retórico [7].

5 RESULTADOS EXPERIMENTALES

El estudio experimental se llevó a cabo usando máquinas eléctricas del laboratorio de enseñanza de la UNRC, con potencias comprendidas entre 4 y 7,5 kVA. Como generador bajo estudio, se empleó un generador de inducción con rotor bobinado, impulsado por un motor de inducción controlado con un variador de velocidad. La fuente de excitación consistió en un generador sincrónico que permite controlar su amplitud y frecuencia. La Fig. 7 muestra el esquema experimental [6].

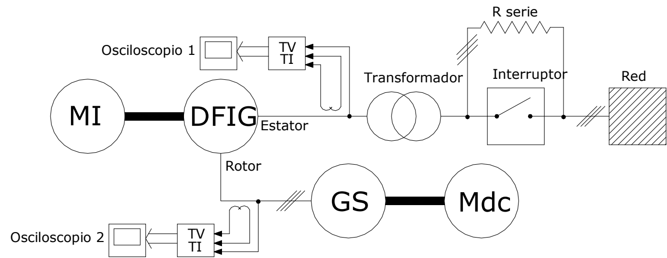


Fig. 7, Esquema experimental.

Se analizó el comportamiento del generador de inducción para la situación de máquina en régimen, suministrando potencia a la red, cuando bruscamente se presenta una de las siguientes tres perturbaciones: (a) descenso brusco de la corriente de excitación rotórica, (b) caída de tensión en terminales de la máquina y (c) cambio repentino de la potencia mecánica suministrada al eje del generador.

Tales perturbaciones rompen el balance existente entre la fem de la máquina y la tensión del sistema, generando transitorios con efecto distinto en los dos caminos posibles donde puede circular la corriente de excitación, también adicionando la presencia de oscilaciones mecánicas de baja frecuencia [4, 6].

La Fig. 8 muestra el desplazamiento o salto de fase de la corriente de carga suministrada a la red por un generador de inducción de rotor bobinado, cuando luego de haber ajustado la corriente de excitación para cumplir las condiciones de paralelo, y haber efectuado tal paralelo, se reduce esta corriente de excitación. El efecto de corriente adelantada, y el opuesto que da lugar a corriente atrasada (no mostrado aquí por limitación de espacio), son equivalentes a los efectos sobre la máquina sincrónica, que permite el trazado de las conocidas curvas “V” [2].

Todos los gráficos que se trascriben a continuación muestran tensión de línea de 220 V. La constante del transductor de corriente es de 100 mV/A.

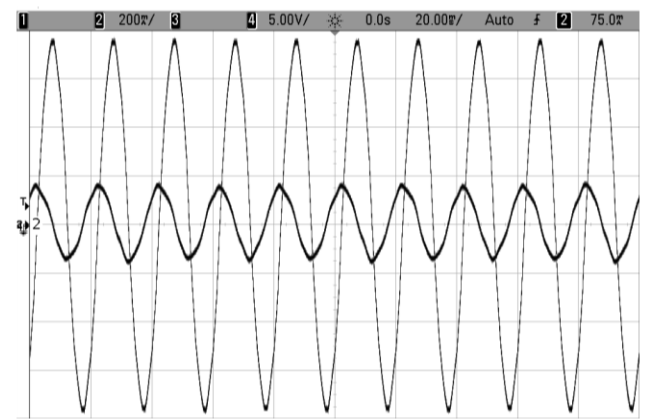


Fig. 8, Adelanto de la corriente de carga luego del descenso de la corriente de excitación rotórica (voltaje: onda mayor, corriente: onda menor) [7].

En caso de producirse una brusca variación de la tensión de red, causada por importante sobrecarga, pérdida de generación, apertura de anillos, etc., se rompe el equilibrio existente entre la fem del generador y la tensión de red. Para el presente estudio, esta caída de tensión de la red puede interpretarse como un exceso (aumento) de excitación de la máquina de inducción. Por ello, si hay una sobre-excitación, la consecuencia es un salto de fase en retraso de la corriente suministrada a la red. El efecto desmagnetizante de esta componente de la corriente de carga compensa la citada sobre-excitación. La Fig. 9 muestra este cambio de corriente de carga como un incremento en el retardo (salto de fase), seguido por un incremento transitorio de corriente durante unos pocos ciclos, cuando la tensión se reduce [7].

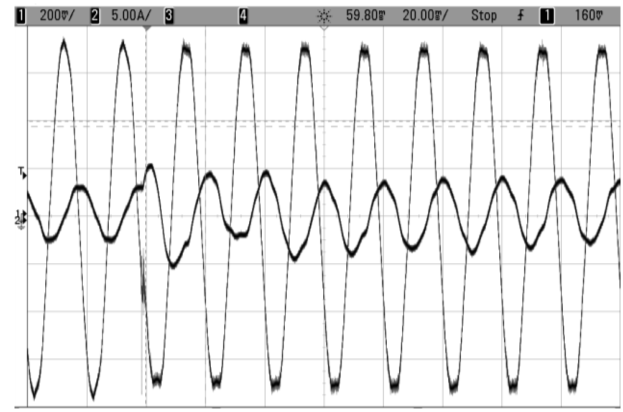


Fig. 9, Reducción de la tensión en terminales (onda mayor) y el consecuente cambio en la corriente de carga (onda menor) [7].

El resultado mostrado en la Fig. 9 corresponde a un generador que previamente a la perturbación, suministraba corriente inductiva. Se verificó experimentalmente un comportamiento similar cuando el generador se encontraba suministrando corriente adelantada. Los cambios observados pueden ser justificados empleando la “teoría del flujo concatenado constante” ya explicada [2].

Cualquier cambio en la velocidad del eje del generador, da por resultado efectos muy notables tanto en los circuitos rotóricos como en los estatóricos. La Fig. 10 muestra la corriente entregada por el generador de inducción frente a un incremento de la velocidad. La corriente que inicialmente presentaba un ligero retraso, sufre un incremento brusco, alcanzando un nuevo ángulo de potencia de equilibrio luego de una serie de oscilaciones (que se observan solo parcialmente en tal figura).

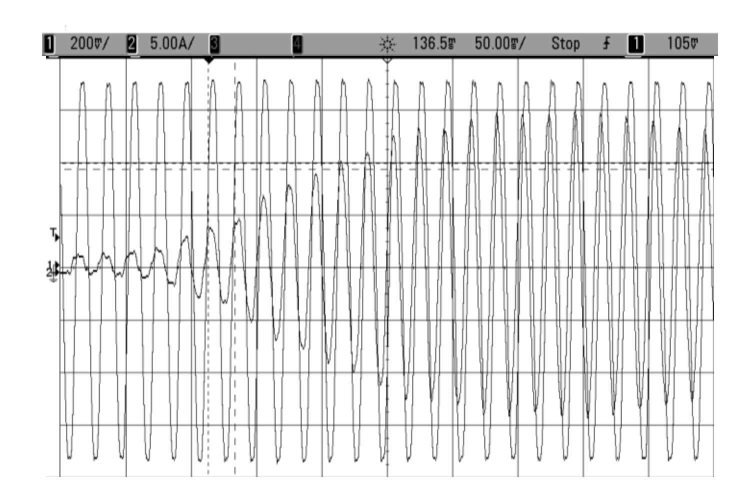


Fig. 10, Variación de la tensión en terminales (onda mayor) y corriente de carga (onda menor) debidas a un incremento repentino de velocidad del generador de inducción.

6 RESULTADOS ANALÍTICOS

El estudio se completó mediante el modelado del equipamiento frente a las condiciones ya estudiadas experimentalmente, empleando para ello el software MATLAB/SIMULINK. En forma cualitativa los resultados analíticos son similares a los experimentales, diferencias dentro del +/− 10%, lo que es aceptable considerando las dificultades en obtener los parámetros característicos de los equipos usados.
A modo de ejemplo, se transcriben en la Fig. 11, los resultados obtenidos al modelar la variación repentina de la velocidad del generador, la que puede compararse con la Fig. 10 obtenida experimentalmente.

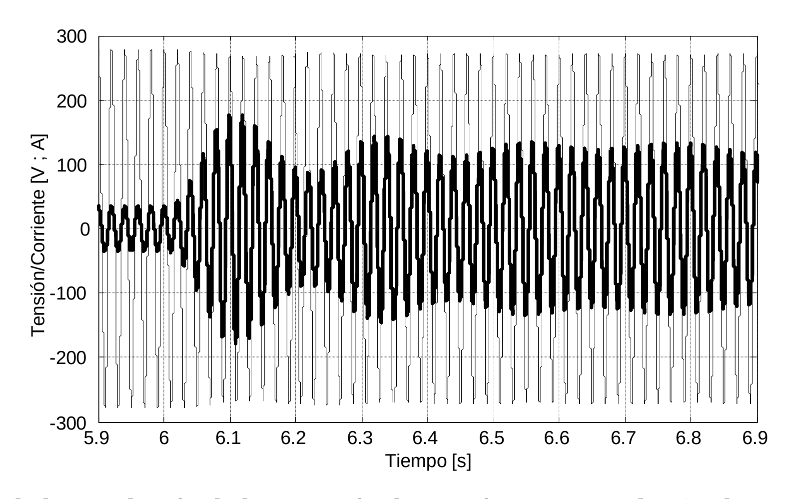


Fig. 11, Resultado de la simulación de la variación de tensión en terminales (onda mayor) y corriente de carga (onda menor) frente a un incremento brusco de la velocidad del generador.

7 CONCLUSIONES

De los estudios teóricos, experimentales y simulados, presentados aquí, se concluye con que el mismo principio de excitación es aplicable tanto a las máquinas sincrónicas, de inducción como así también a las fuentes que emplean convertidores. Por ello cuando se presentan perturbaciones, el comportamiento de las corrientes de excitación y su distribución entre estator y rotor puede analizarse empleando los conceptos

teóricos de “condiciones para el desarrollo continuo de cupla” y de “flujo concatenado constante”, efectuando las correspondientes adaptaciones a las condiciones de la generación distribuida.

8 BIBLIOGRAFÍA

[1] H.L. Willis, W.G. Scout, *Distributed Power Generation: Planning and Evaluation*, Marcel-Dekker, New York, 2000.
[2] A.E. Fitzgerald, C. Kingsley, A. Kusko, *Electric Machinery*, McGraw-Hill, New York, 1971.
[3] J. G., Trapp, J. B. Parizzi, F. A. Farret, A. B. Serdotte, A. J. Longo, “Stand alone self-excited induction generator with reduced excitation capacitors at fixed speed,” *Brazilian Power Electronics Conference*, Natal, Brazil, pp. 955-962, 2011.
[4] M.S. Vicatos, J.A. Tegopoulos, “Transient state analysis of a doublyfed induction generator under three-phase short-circuit,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 6, No. 1, pp. 62-68, 1991.
[5] J.C. Gomez, M. M. Morcos, “Distributed generation: short-circuit current supplied by induction generators,” *Proc. IEEE PES T&D LATIN AMERICA*, Bogotá, Colombia, 2008.
[6] S. M. Nesci, J. C. Gómez, “Effect of the excitation type and level on the short-circuit current supplied for induction generators,” *Proc. IEEE PES T&D LATIN AMERICA*, Montevideo, Uruguay, 2012.
[7] S. M. Nesci, J. C. Gomez, M. M. Morcos, “Excitation Sharing between the Grid and the Rotor Excitation Source of a Doubly-Fed Induction Generator in the Presence of Distribution System Transients”, *IEEE Innovative Smart Grid Technologies Europe 2013 (IEEE ISGT Europe)*, Copenhagen, Denmark, 2013.